

基于 SM-PSO 算法的分布式 SAR 卫星系统构形优化设计方法研究

张锦绣 王继河 曹喜滨 兰盛昌
(哈尔滨工业大学卫星技术研究所 哈尔滨 150080)

摘要: 针对由 3 颗或者 3 颗以上卫星组成的分布式 SAR 卫星系统, 该文提出了一种基于改进粒子群算法的构形优化设计方法。首先给出了系统卫星平均轨道要素偏差的确定方法, 并确定了分布式 SAR 卫星系统构形设计的一般流程。为了准确快速的完成基于任务要求的系统构形设计, 提出了基于 SM-PSO 算法的系统构形优化设计方法。最后, 以构形稳定性为目标函数, 有效基线范围、工作时间和地面覆盖带为约束条件, 对系统构形进行优化设计。仿真结果表明: 该系统构形优化设计方法得到的系统构形参数可以较好地满足系统的覆盖特性以及系统在长期运行过程中能够保持相对稳定的有效基线。

关键词: 分布式 SAR 系统; 改进粒子群算法; 构形优化设计; 优化指标

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)11-2714-05

SM-PSO Algorithm-Based Configuration Optimal Design of Distributed SAR Satellite System

Zhang Jin-xiu Wang Ji-he Cao Xi-bin Lan Sheng-chang

(Research Center of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Aimed at the distributed SAR satellite system consisting of more than three satellites, SM-PSO algorithm-based configuration optimal design is proposed in this paper. The mean orbital elements differences of among satellites are given and the normal configuration design flow of distributed SAR satellite system is presented. In order to realize exactly and fleetly system configuration design faced to mission requirements, the SM-PSO algorithm-based configuration optimal design method is developed. The configuration optimal design is completed in terms of configuration stability, limited by effective baseline range, working time and ground coverage area. It is indicated that the system configuration initial parameters from this method can meet with ground converge and relative steady effective baseline requirements.

Key words: Distributed SAR satellite system; SM-PSO algorithm; Configuration optimal design; Optimizing function

1 引言

分布式合成孔径雷达(SAR)系统是由多颗雷达卫星协同工作的天基分布式雷达系统, 可以同时具备宽观测带高分辨率SAR成像侦察、地面慢动目标检测(GMTI)、高精度InSAR测高^[1]。依据任务需求提出合理的系统构形及其设计方法是分布式空间观测系统任务成功完成的重要基础和保障。

合理的系统构形能够提供空间观测所需要的稳定基线, 同时也有利于减少系统各成员卫星用于构形保持的燃料消耗, 延长系统的工作寿命。Lane和Press等分析了分布式卫星系统不同构形的设计方法^[2, 3]。国内对分布式SAR系统构形设计研究主要集中于主星带辅星体制系统上, 黄海风、何峰等提出了小卫星编队SAR系统的构形设计方法^[4-6]。张育林等以高程精度为目标函数, 提出了分布式SAR卫星编队构形优化设计方法^[7]。

本文针对由3颗或者3颗以上卫星组成的分布式SAR卫星系统, 以InSAR测高任务为主时, 分析满足系统任务约束的系统构形设计方法, 以构形稳定性为目标函数, 有效基线范围和地面覆盖带为约束条件对系统队形进行优化设计。

2 系统构形设计一般方法

为了准确描述分布式SAR系统空间构形, 首先定义系统卫星相对运动平面内初始相位角和平面外初始相位角, 分别如图1和图2所示。其中 α 定义为系统成员卫星相对于参考卫星的距离矢量在相对运动平面内的分量与参考卫星地心距负方向的夹角; β_p 定义为系统成员卫星相对于参考卫星的位置矢量在垂直轨道向平面内的投影与相对运动坐标轴 Z_s 的夹角, 以下如无特殊说明, 均称 β_p 为基线高程角。

以文献[8]提出的基于平均轨道要素的干涉SAR编队构形设计方法为基础, 为了确保相对运动轨迹在相对运动坐标系XZ面的投影近似一条直线, 要求分布式SAR卫星系统径向(X向)和垂直轨道平面外(Z向)相对运动满足

$$|\dot{x}|/|\dot{z}| = \tan \beta_p \quad (1)$$

2007-04-23 收到, 2007-09-24 改回

国家“十一五”预研背景项目(113020102)和国家博士后科学基金(20070410265)资助课题

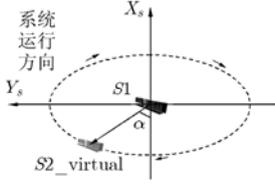


图1 系统平面内
相对运动初始相位角

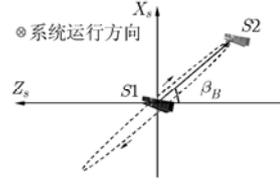


图2 系统垂直轨道平面
内相对运动初始相位角

式(1)中, $|\bar{x}|$ 为分布式SAR卫星系统径向相对距离; $|\bar{z}|$ 为分布式SAR卫星系统垂直轨道平面外相对距离。

为了使得系统在工作时段具有最优 DEM 有效基线, 要求^[8]

$$\begin{aligned} (\bar{x}^2 + \bar{z}^2)^{1/2} &= \left([A_x \cos(\bar{f} + \alpha)]^2 + [A_z \sin(\bar{f} + \bar{\omega} - \gamma)]^2 \right)^{1/2} \\ &= B_{\perp} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中 A_x 为分布式SAR卫星系统径向相对运动幅值; A_z 为分布式SAR卫星系统垂直轨道平面外相对运动幅值; α 为 x 向(径向)周期相对运动相位初值; γ 为 z 向(轨道面外)周期相对运动相位初值; \bar{f} 为系统参考卫星平均真近点角; B_{\perp} 为系统卫星相对距离矢量在垂直飞行轨道面的投影长度。

且系统垂直轨道面投影基线 B_{\perp} 与最优有效基线 B_{opt} 满足^[8]

$$B_{\perp} = B_{opt} / \cos(\theta_L - \beta_B) \quad (3)$$

从而, 系统成员卫星相对平均轨道要素偏差表达式为

$$\delta \bar{a} = \frac{2\bar{a}(7 - 4e^2)[\bar{e}(3\cos^2 \bar{i} - 1)/(1 - e^2)\delta \bar{e} - \sin 2\bar{i}\delta \bar{i}]}{7(2 - e^2)(3\cos^2 \bar{i} - 1) + 4\bar{a}^2(1 - e^2)^{3/2}/(J_2 R_e^2)} \quad (4)$$

$$\delta \bar{e} = \frac{[(\tan^2 \beta_B B_{\perp}^2)/(1 + \tan^2 \beta_B)]^{1/2}}{\bar{a}} \cos \alpha \quad (5)$$

$$\delta \bar{i} = \frac{[(B_{\perp}^2)/(1 + \tan^2 \beta_B)]^{1/2}}{\bar{R}} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \bar{\omega} - \alpha\right) \quad (6)$$

$$\delta \bar{\Omega} = \frac{[(B_{\perp}^2)/(1 + \tan^2 \beta_B)]^{1/2}}{\bar{R} \sin \bar{i}} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \bar{\omega} - \alpha\right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \delta \bar{\omega} &= -\frac{[(B_{\perp}^2)/(1 + \tan^2 \beta_B)]^{1/2}}{\bar{R} \tan \bar{i}} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \bar{\omega} - \alpha\right) \\ &\quad - \frac{[(\tan^2 \beta_B B_{\perp}^2)/(1 + \tan^2 \beta_B)]^{1/2}}{\bar{a}e(1 - e^2)^2} \sin \alpha \end{aligned} \quad (8)$$

$$\delta \bar{M} = \frac{[(\tan^2 \beta_B B_{\perp}^2)/(1 + \tan^2 \beta_B)]^{1/2}}{\bar{a}e(1 - e^2)^{1/2}} \sin \alpha \quad (9)$$

式(4)~式(9)中, $\bar{a}, \bar{e}, \bar{i}, \bar{\Omega}, \bar{\omega}, \bar{M}, \delta \bar{a}, \delta \bar{e}, \delta \bar{i}, \delta \bar{\Omega}, \delta \bar{\omega}, \delta \bar{M}$ 分别表示卫星的平均半长轴、平均偏心率、平均轨道倾角、平均 RAAN、平均近地点幅角、平均平近点角及其偏差, \bar{R} 为卫星的平均地心距。

进而, 分布式SAR系统构形一般设计方法由以下7个步骤组成:

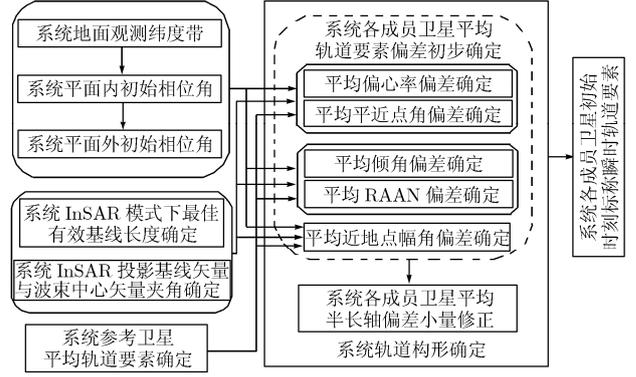


图3 分布式SAR系统构形设计方法

(1) 由系统地面观测纬度带约束确定系统平面内相对运动初始相位角和平面外相对运动初始相位角;

(2) 依据技战术指标确定系统InSAR模式下最佳有效基线长度以及系统在垂直轨道面投影基线矢量于雷达波束中心矢量的夹角;

(3) 在系统参考卫星平均轨道要素给定情况下, 由系统基线参数和系统平面内初始相位角确定系统成员卫星平均偏心率和平近点角偏差;

(4) 由系统参考卫星平均轨道要素、系统基线参数和系统平面外初始相位角确定系统成员卫星平均倾角和平均升交点赤经偏差;

(5) 由系统参考卫星平均轨道要素、系统基线参数和系统平面内和平面外初始相位角确定系统成员卫星平均近地点幅角偏差;

(6) 为了尽量减小地球扁率 J_2 项摄动对系统构形造成的影响, 对系统成员卫星平均半长轴偏差进行小量修正;

(7) 利用解析轨道理论将系统卫星的平均轨道要素初始条件转化为相应的瞬时轨道要素^[7], 得到系统各卫星初始时刻标称瞬时轨道要素。

3 SM-PSO算法在构形优化设计中的应用

为了准确快速地完成基于任务要求的多星系统的构形设计就需要找一种高效优质的寻优方法。目前广泛使用的误差反向传播BP算法或遗传算法收敛速度慢, 常受局部极小点的困扰或自身参数选取困难, 存在早熟问题。

本节将采用单纯形-粒子群优化方法的混合算法^[9](SM-PSO)进行系统的构形优化设计。该混合算法将单纯形搜索法(SM)有机地融入粒子群优化算法^[10](PSO)中, 可以减少计算规模, 有效增强PSO算法的局部搜索能力, 提高算法的鲁棒性能^[10-12]。通过SM方法和PSO方法混合形成的混合算法, 可以在不增加计算量的基础上将融合前两种算法的优势互补, 充分发挥SM局部搜索能力强的特点, 增强PSO的局部搜索能力。同时混合算法不要求导或其它辅助信息, 只需要计算目标函数和约束函数。

从而, 基于SM-PSO算法的系统构形优化设计流程如图4

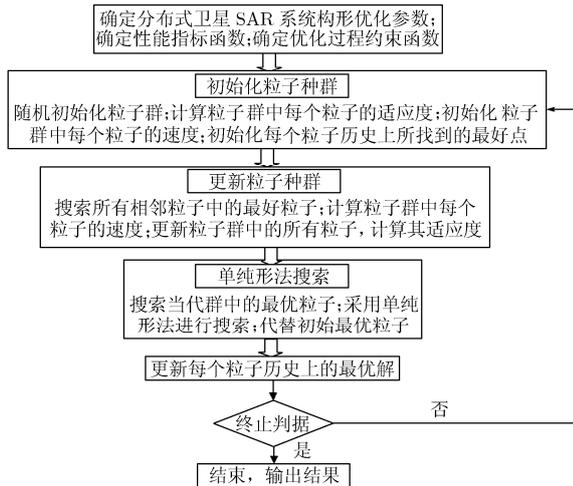


图4 基于SM-PSO算法的系统构形优化设计流程

所示:

(1)确定系统构形优化参数、优化性能指标函数和约束函数;

(2)初始化粒子种群。包括随机初始化粒子群、计算粒子群中每个粒子的适应度、初始化粒子种群每个粒子的速度 $VEL[i]$ 以及每个粒子历史上所找到的最好点 $PBEST[i]$;

(3)更新粒子种群

(a)搜索粒子 $POP[i]$ 所有相邻粒子中的最好粒子 $GBEST[i]$;

(b)按照以下公式计算种群中每个粒子 ($POP[i]$) 的速度 ($VEL[i]$)。

$$VEL[i] = W \times VEL[i] + C_1 \times \text{rand}(1) \times (PBEST[i] - POP[i]) + C_2 \times \text{rand}(2) \times (GBEST[i] - POP[i]) \quad (10)$$

式(10)中, W 为惯性权重; $\text{rand}()$ 为均匀分布在(0, 1)之间的随机数; C_1 和 C_2 为学习因子, 一般取2。

(c)更新种群中的所有粒子 ($POP[i]$), 计算种群中每个粒子的适应度 $POP[i] = POP[i] + VEL[i]$

(4)搜索当代粒子群中的最优粒子, 将该粒子作为单纯形法(SM)的初始点进行单纯形搜索, 以搜索到的最好点代替该最优粒子;

(5)更新每个粒子之前所找到的最优解 $PBEST[i]$;

(6)算法终止判断。若满足要求则停止计算, 输出结果; 否则返回步骤3继续进行搜索。

对于SM-PSO算法来说, 其主要控制参数及其在算法中表示的意义和设置分别为

(a)粒子群规模: 一般取20~40, 对于规模较大的问题, 可以取到100甚至更大。

(b)最大演化代数: 这个参数的设置依赖于粒子群的规模以及所优化问题的复杂程度, 建议采用80~300。

(c)相邻粒子的个数: 该参数越大, 算法的收敛速度越快, 但容易陷入局部最优; 反之, 收敛速度越慢, 且不易陷入局

部最优。建议取4倍的设计向量维数。

(d)权重: 描述当前速度对新速度的影响程度。该参数大有利于进行大范围的全局搜索。建议取值范围为0.4~1.4。

4 系统构形设计优化指标和约束函数

为了使得系统各成员卫星间垂直轨道面外相对运动变化率最小, 取系统构形设计优化指标为

$$J = \min \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n (\delta \dot{\Omega}_{ij})^2 \quad (11)$$

对于分布式SAR卫星系统来说, 系统各成员卫星除相对于参考卫星形成满足系统任务要求的有效观测基线, 还要求除参考卫星外的其余成员卫星间形成的有效观测基线也在适用范围之内。从而, 系统卫星间相对运动约束函数为

$$\left| x_{ij} - \frac{1}{n} \sum_{\substack{i,j=2 \\ i < j}}^n x_{ij} \right| + \left| z_{ij} - \frac{1}{n} \sum_{\substack{i,j=2 \\ i < j}}^n z_{ij} \right| \leq \varepsilon \quad (12)$$

从分布式SAR卫星系统的地面覆盖范围要求来说, 系统各成员卫星在一个轨道周期内均存在满足任务要求的有效工作基线。假定系统升轨顺序覆盖北半球, 则系统优化设计过程中的各协同成员卫星地面覆盖纬度带约束函数可以表示为

$$\left| \frac{\pi}{2} - \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n \varphi_{T_{ij}} \right| \leq \varepsilon \quad (13)$$

式(13)中, n 为系统卫星的数量, 为了降低系统的任务成本, 要求采用最小数量的系统成员卫星满足地面覆盖范围的要求。

另外, 受有效载荷自身条件约束, 系统各卫星发射雷达信号进行主动工作时间均在一定范围之内, 在保证系统所有成员卫星工作在最佳基线范围基础上将时间约束转化为相对运动相位角约束条件如下

$$\bar{f} + \alpha_{ij} \in \left[\pi - \frac{\psi}{2}, \pi + \frac{\psi}{2} \right] \text{ and } \left[2\pi - \frac{\psi}{2}, 2\pi + \frac{\psi}{2} \right] \quad (14)$$

从而可以得到系统构形优化设计时的性能指标如式(11)所示, 式(12)~式(14)为系统构形优化设计的约束函数。

5 系统构形优化设计流程

引入SM-PSO优化算法完成面向任务的多星系统构形设计, 结合了单纯形法局部搜索能力强的特点, 有效增强PSO算法的局部搜索能力。分布式SAR卫星系统构形优化设计流程主要有以下4个步骤:

(1)依据技战术指标确定系统基线参数和系统参考卫星轨道要素;

(2)确定系统构形优化参数、优化性能指标函数和约束函数;

(3)通过SM-PSO算法进行指标优化, 最终分别确定系统

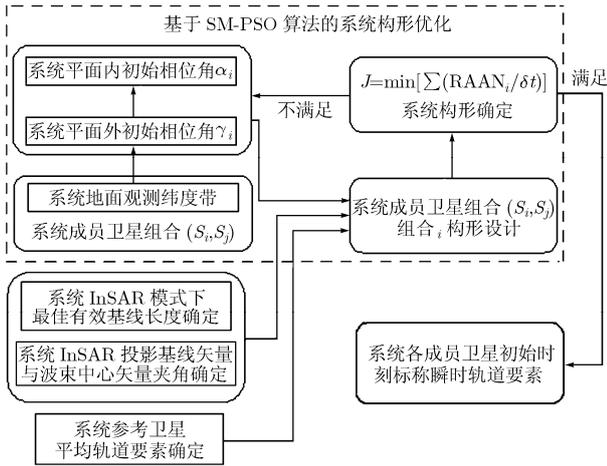


图5 面向任务要求的系统构形优化设计

各卫星间相对平均轨道要素偏差:

(4)利用图5所示流程求取系统卫星的初始参数,完成系统构形优化设计。

6 仿真结果及分析

以表2给出的卫星-参数系统参考卫星的参数,除地面覆盖纬度范围外以表1给定的系统技战术指标,进行系统构形优化设计。对于系统构形优化设计来说,依据所涉及的问题规模,粒子群规模取为30,最大衍化代数采用100代,相邻粒子的个数为12,权重取值为0.5。系统成员卫星相对于参考卫星的初始相位角与性能指标之间的关系见图6,系统性能指标等高线见图7。

对于由3颗卫星组成的分布式SAR卫星系统来说,在系统参考卫星轨道参数给定情况下,当除参考卫星外的两颗成员卫星间相对初始相位角为60°或者300°时,合理选择其中任意一颗成员卫星相对于参考卫星的初始相位角可以使得系统性能指标达到全局最小。在此情况下,任意一颗成员

表1 系统技战术指标和任务要求

参数	指标
雷达波长	3cm
雷达波束中心视角	38.5°
斜距分辨率	5m
信噪比	10dB
单星发射信号能力	4min

表2 三星系统成员卫星瞬时轨道要素

轨道要素	卫星 1	卫星 2	卫星 3
$a(\text{km})$	6882.954257	6882.951263	6882.953479
e	0.000724989	0.000621714	0.000710630
$i(^{\circ})$	97.365875	97.373429	97.367899
$\Omega(^{\circ})$	145.000	144.997960	144.992388
$\omega(^{\circ})$	270.000	272.836981	278.678193
$M(^{\circ})$	180.000000	177.162755	171.320824

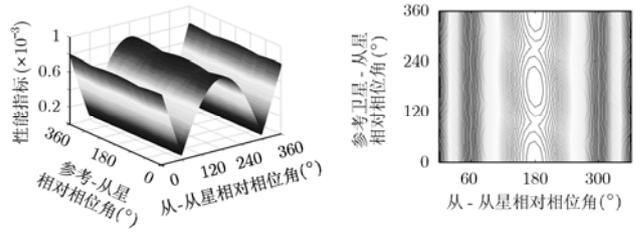


图6 相位角与性能指标关系

图7 系统性能指标等高线

卫星相对于参考卫星的初始相位角可以分别选择为 $30 \pm 15^{\circ}$ 、 $90 \pm 15^{\circ}$ 、 $90 \pm 15^{\circ}$ 、 $150 \pm 15^{\circ}$ 、 $210 \pm 15^{\circ}$ 、 $270 \pm 15^{\circ}$ 和 $330 \pm 15^{\circ}$, 在满足系统性能指标的前提下系统各成员卫星间在轨道平面外的相对运动变化率最小。

选择系统中一颗卫星作为参考卫星(卫星1),以系统成员卫星2相对于参考卫星的初始相位角 15° 为例,给出系统各成员卫星初始轨道参数,进行系统构形基线性能分析。表2为三星系统各卫星初始瞬时轨道要素。

由表2给定的系统各成员卫星初始轨道参数,在系统卫星面质比一致情况下,系统构形发散主要影响因素 J_2 摄动对成员卫星相对轨道平面外运动变化率的指标分别为 6.3×10^{-6} 、 1.69×10^{-6} 、 4.6×10^{-6} 。系统降交点过赤道时刻空间构形和相对位置如图8所示,系统有效基线如图9。

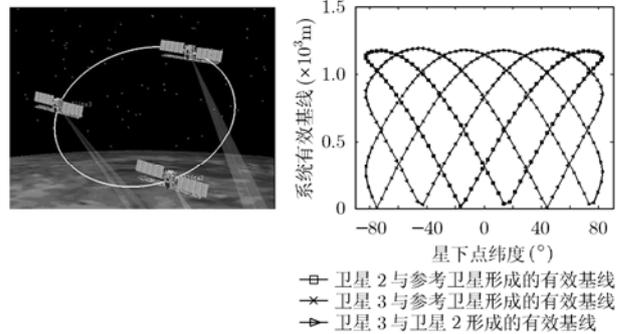


图8 过降交点时刻系统构形和相对位置

图9 系统有效基线

由图9可知,采用图5给出的系统构形优化设计方法得到的由3颗卫星组成的分布式SAR卫星系统,在任意地面纬度范围均可以提供相对稳定的有效基线来满足系统任务要求。

为验证表2所述系统空间构形在真实空间环境下的稳定性及空间基线性能,在卫星工具包(Satellite Tools Kit)软件环境下进行HPOP高精度轨道仿真验证。系统在轨运行6天,系统有效基线演化过程如图10所示。

结合图10所示系统初始状态有效基线可以得到,在初始运行1天后,系统各成员卫星协同工作得到的有效基线可以非常好地满足地面覆盖特性要求。随运行时间增加,由卫星2与参考卫星形成的有效基线逐渐减小,运行6天后减小150m,仍可以覆盖相应地面纬度带;由卫星3与参考卫星形成的有效基线也相应减小,卫星2与参考卫星形成的有效基

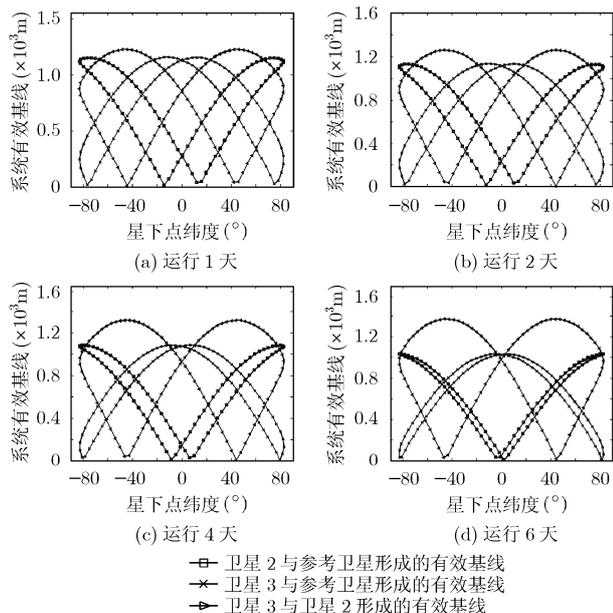


图10 系统有效基线演化过程(6天)

线变化量级相等, 其最佳有效基线覆盖地面纬度带由 $[30^\circ, -30^\circ]$ 缩减到 $[25^\circ, -25^\circ]$ 以下; 由卫星3与卫星2形成的有效基线逐渐增大, 运行6天后增加200m, 但其最佳有效基线范围覆盖的相应地面纬度带基本不发生变化。

在不频繁进行系统构形修正前提下, 为了保证系统各成员卫星形成的最佳有效基线工作范围相对应的地面覆盖能基本实现南北纬 80° 的覆盖要求, 需要适当放宽系统最佳有效基线工作范围, 进一步对存在沿轨迹向基线分量情况下进行系统成像和数据处理技术研究。

7 结束语

采用本文所提出的面向任务的多星分布式SAR卫星系统构形优化设计方法得到的系统构形初始参数可以较好地满足系统的覆盖特性以及系统在长期运行过程中能够保持相对稳定的有效基线, 使得系统工作在正常的有效基线范围之内。

证明了本文提出的基于SM-PSO算法的面向任务要求的系统构形优化设计方法和设计流程的有效性和正确性。

参考文献

- [1] Massonnet D. The interferometric cartwheel: A constellation of passive satellites to produce radar images to be coherently combined. *Int. J Remote Sensing*, 2001, 22(12): 2413-2430.
- [2] Lane C and Axelrad P. Formation design in eccentric orbits using linearized equations of relative motion. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, 29(1): 146-159.
- [3] Press M J, Traggesser, G S, and Lovell T. A geometric approach to orbital formation mission designs. *Advances in the Astronautical Sciences, Space Flight Mechanics*, 2005,

119(3): 3141-3157.

- [4] 何峰, 梁甸农, 董臻. 主星带伴随小卫星编队SAR系统干涉精度与编队构形设计. *宇航学报*, 2005, 26(4): 455-460.
He Feng, Liang Dian-nong, and Dong Zhen. Height-measure accuracy of INSAR in spaceborne parasitic SAR system and flying formation design. *Journal of Astronautics*, 2005, 26(4): 455-460.
- [5] 黄海风, 邓泳, 梁甸农. 基于测高精度最优值的星载分布式InSAR编队构形设计方法. *国防科技大学学报*, 2005, 27(4): 85-90.
Huang Hai-feng, Deng Yong, and Liang Dian-nong. A formation design approach of the distributed spaceborne InSAR based on height-measure optimal accuracy value. *Journal of National University of Defense Technology*, 2005, 27(4): 85-90.
- [6] 孟云鹤, 陈荣娟, 戴金海. 星载InSAR辅星编队优化设计与分析. *中国空间科学技术*, 2006, (2): 10-16.
Meng Yun-he, Chen Rong-juan, and Dai Jin-hai. Optimal design and analysis of concomitant satellite formation for spaceborne InSAR. *Chinese Space Science and Technology*, 2006, (2): 10-16.
- [7] 郝继刚, 张育林. SAR干涉测高分布式小卫星编队构形优化设计. *宇航学报*, 2006, 27(4): 654-659.
Hao Ji-gang and Zhang Yu-lin. Formation optimized design for the height measurement of InSAR using distributed micro-satellites. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(4): 654-659.
- [8] 张锦绣, 曹喜滨, 林晓辉. 基于平均轨道要素的干涉SAR编队构形设计方法研究. *宇航学报*, 2006, 27(4): 670-675.
Zhang Jin-xiu, Cao Xi-bin, and Lin Xiao-hui. Formation configuration, orbit design and baseline performance analysis based on DEM and GMTI. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(4): 670-675.
- [9] Kennedy J and Eberhart R C. Particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Neural Networks - Conference Proceedings*, 1995, 4: 1942-1948.
- [10] Coello C, Carlos A, and Pulido G T, *et al.* Handling multiple objectives with particle swarm optimization. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, 2004, 8(3): 256-279.
- [11] Venter G. Particle swarm optimization. *Collection of Technical Papers -AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 2002, 1: 282-290.

张锦绣: 男, 1978年生, 讲师, 博士, 从事分布式系统总体、构形设计和总体参数对成像指标的影响以及数学仿真方面研究。

王继河: 男, 1982年生, 博士生, 从事分布式系统自主安全管理与控制及半物理仿真方面研究。

曹喜滨: 男, 1963年生, 长江学者, 教授, 博士生导师, 主要从事卫星及分布式卫星系统总体设计等方面的研究。

兰盛昌: 男, 1981年生, 博士生, 从事分布式系统电子系统设计与仿真方面研究。